



PROCENA RADA VETROELEKTRANE I UTICAJ NA KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE

ASSESSMENT OF WIND POWER PLANT OPERATION AND IMPACT ON THE POWER QUALITY

Aleksandar STANISAVLJEVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija
Vladimir A. KATIĆ, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Prilikom projektovanja vetroelektrana (VE), vrše se opsežna ispitivanja i merenja potencijala vetra na predviđenoj lokaciji, na bazi kojih se daju predikcije o budućoj (projektovanoj) proizvodnji. One mogu biti osnova i za procenu mogućeg uticaja na kvalitet električne energije (KVEE) u mrežu. Međutim, u eksploataciji vetroelektrane potencijal energije vetra ne mora odgovarati projektovanom, pa ni dinamika promene energije, odnosno uticaj na kvalitet isporuke. Iz tog razloga pogodno je imati metodu za brzu procenu rada i proizvodnje, kao i uticaja na KVEE. U radu se primenom ranije razvijene metode bazirane na linearizovanom modelu karakteristike snage vetroturbine i podataka o srednjoj brzini vetra, vrši procena snage, odnosno proizvedene energije nekog vetrogeneratora, a zatim i vetroelektrane. Dinamičkim posmatranjem ovih parametara i dobijanjem inputa o brzini vetra u kraćim vremenskim intervalima, može se opisana metoda primeniti i za ocenu uticaja na kvalitet isporuke električne energije. Dodatni problem je kvalitet isporučene električne energije, odnosno pojava viših harmonika, koji se mora nezavisno obrađivati.

Ključne reči: Vetroelektrana, Procena proizvodnje, Kvalitet električne energije

ABSTRACT

When designing wind farms (WPPs), extensive tests and measurements of wind potential are performed at the planned location, on the basis of which predictions about future (projected) production are given. They can also be the basis for assessing the possible impact on power quality (PQ) in the network. However, in the operation of a wind farm, the potential of wind energy does not have to correspond to the projected, nor the dynamics of energy change, i.e., the impact on the quality of delivery. For this reason, it is convenient to have a method for rapid assessment of work and production, as well as the impact on PQ. The paper uses the previously developed method based on a linearized model of wind turbine power characteristics and data on the average wind speed, to estimate the power, i.e., the energy produced of a wind generator, and then the wind farm. By dynamically observing these parameters and obtaining inputs on wind speed in shorter time intervals, the described method can be applied to assess the impact on the quality of electricity supply. An additional problem is the quality of the delivered electricity, i.e., the appearance of higher harmonics, which must be processed independently.

Keywords: Wind farm, Production estimation, Power Quality

Kontakt informacije o autorima: e-mail: Aleksandar Stanisavljević: acas@uns.ac.rs; Vladimir Katić: katav@uns.ac.rs;

1. UVOD

Pored hidroelektrana, vetroelektrane predstavljaju najznačajniji potencijal i imaju najbolje perspektive razvoja u sektoru obnovljivih izvora energije. Na kraju 2021. god. u Evropi je bilo instalisano 235,7 GW vetroelektrana, od čega je u Srbiji 0,374 GW [1]. Time je pokriveno oko 15% potrošnje električne energije, dok u Srbiji oko 0,4%. Očekuje se da će do 2026. god. kapaciteti u Evropi porasti na 341 GW (realni scenario), što će doprineti daljem uvećanju značaja i učešća ovih izvora u generisanju električne energije [1].

Vetroelektrane (VE) se prave u vidu većih ili manjih grupa vetrogeneratora (VG), odnosno u vidu vetro-parkova (*Wind Parks*) ili farmi vetrenjača (*Wind Farms*). Pre izgradnje VE, vrše se opsežna ispitivanja i merenja potencijala vetra na predviđenoj lokaciji, na bazi kojih se daju predikcije o budućoj (projektovanoj) proizvodnji.

One mogu biti osnova i za procenu mogućeg uticaja na kvalitet električne energije (KVEE). Međutim, u eksploataciji vetroelektrane potencijal energije vetra ne mora odgovarati projektovanom, pa ni dinamika promene, odnosno uticaj na KVEE. Iz tog razloga pogodno je imati odgovarajuće inženjerske (praktične) metode za brzu procenu rada VE i uticaja na KVEE.

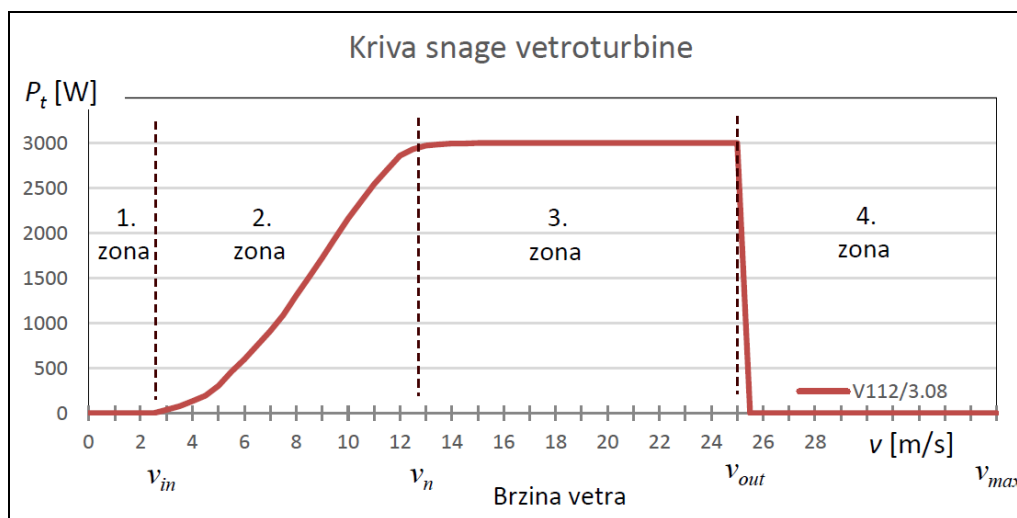
Cilj ovog rada je da na bazi linearizovanog modela karakteristike snage vetroturbine i podataka o srednjoj brzini vetra proceni snagu, odnosno proizvedenu energiju nekog vetrogeneratora, a zatim i vetroelektrane. Dinamičkim posmatranjem ovih parametara i dobijanjem inputa o brzini vetra u kraćim vremenskim intervalima, može se opisana metoda primeniti i za ocenu uticaja na neke aspekte KVEE.

2. MODELOVANJE VG

Za procenu rada jedne VE ključni parametar je ostvarena izlazna snaga, odnosno proizvedena energija, koji predstavlja rezultat rada niza VG. Pojedinačni VG je u stvari elektro-mehanički agregat, gde se konverzija energije vetra u rotaciono kretanje osovine (rotora) električnog generatora (EG) obavlja pomoću vetroturbine (VT) [2]. Za procenu snage VG najvažniji je adekvatan model VT. Tipična karakteristika VT, odnosno kriva snage u funkciji brzine vetra, predstavljena je na slici 1. Mogu se uočiti četiri zone (oblasti):

- 1 – polazna $P_t = 0$ ($0 < v < v_{in}$),
- 2 – radna $P_t = f(v)$ ($v_{in} < v < v_n$),
- 3 – nominalna $P_t = P_n$ ($v_n < v < v_{out}$), i
- 4 – zaustavna $P_t = 0$ ($v_{out} < v < v_{max}$).

gde je P_t snaga turbine, v_{in} polazna brzina, v_n nominalna brzina, v_{out} zaustavna brzina, v_{max} maksimalna brzina, $f(v)$ nelinearna funkcija snage u radnoj zoni, a P_n nominalna snaga VT. Vidi se da se snaga, odnosno moment na osovini VT javlja ako je brzina vetra u radnoj ili u nominalnoj zoni, dok je u ostale dve snaga jednaka nuli. U radnoj oblasti snaga se nelinearno menja (karakteristika je nelinearna), dok je u nominalnoj konstantna, odnosno održava se konstantnom pomoću *stall* i *pitch* kontrole lopatica [2]. Kod modelovanja, problem se svodi na adekvatno predstavljanje nelinearnog dela (nelinearne karakteristike).



Slika 1. Kriva snage (karakteristika) vetroturbine (adaptirano prema VT: Vestas V112/3.08 [3])

U literaturi je poznat veći broj različitih modela, koji baziraju na različitim aproksimacijama nelinearne krive (karakteristike) snage VT. Poznati su parametrijski/neparametrijski, deterministički/probabilistički, stohastički i IEC modeli [4]. Međutim, za inženjersku procenu traže se da oni budu jednostavni, ali dovoljno tačni. Te zahteve zadovoljavaju parametrijski - polinomijalni modeli, koji krivu snage predstavljaju određenom matematičkom funkcijom. Ta funkcija može biti linearna, kvadratna, kubna, binomna, na bazi Vejbulove raspodele, eksponencijalna, ili fitovana (podaci od proizvođača) [4]. Za njihovu implementaciju potrebno je poznavanje samo osnovnih (opštih) podataka o turbini i to: v_{in} , v_{out} , v_n , i P_n . Opšti oblik ove funkcije može se napisati kao:

$$P_t = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \wedge v > v_{out} \\ f(v), & v_{in} < v < v_n \\ P_n, & v_n < v < v_{out} \end{cases} \quad (1)$$

a pomenuti modeli praktično se primenjuje samo na funkciju $f(v)$. Ove modele odlikuje jednostavnost, mali broj ulaznih podataka i lakoća izračunavanja. Nedostaci su delimično odstupanje od toka krive, manja tačnost u

odnosu na ostale, kao i potreba da se adaptiraju parametri modela. Međutim, kao takvi, oni su odgovarajući, pogodni za inženjerske procene, odnosno za brzu predikciju snage i estimaciju proizvedene energije. Najjednostavniji polinomijalni model je linearni, odnosno onaj kod kojeg je karakteristika u radnoj zoni zamenjena linearnom funkcijom, pa se sada (1) može napisati kao [4,5]:

$$P_t = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \wedge v > v_{out} \\ P_n \cdot \frac{v - v_{in}}{v_n - v_{in}}, & v_{in} < v < v_n \\ P_n, & v_n < v < v_{out} \end{cases} \quad (2)$$

U [5] je pokazano da se ovaj model može uspešno primeniti za procenu izlazne snage, odnosno energije neke vetroturbine. Metoda iz [5] bazira na usrednjavanju snage u nekom vremenskom intervalu (godina dana, tromesečno (sezonski), mesečno, nedeljno ili dnevno), čime se jednostavno izračunava srednja snaga VT, kao:

$$P_{tSR} = P_n \cdot \left(1 - \frac{v_{in} + v_n}{2 \cdot v_{out}} \right) \quad (3)$$

Radi adekvatnog predstavljanja brzine vetra, koriste se podaci za odgovarajuću srednju vrednost brzine vetra (godišnja, tromesečna (sezonska), mesečna, nedeljna ili dnevna), kao i verovatnoća pojavljivanja neke brzine vetra bazirana na *Rayleigh*-ovoj funkciji, data sa:

$$\Psi(v \geq v_x) = e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v_x}{v_{SR}} \right)^2} \quad (4)$$

gde je v_x neka proizvoljna brzina u opsegu $0 < v < v_{max}$. Sada je srednja snaga VT data sa [5]:

$$P_{tSR} = \frac{P_n}{2} \cdot (\Psi(v > v_{in}) + \Psi(v > v_n)) \quad (5)$$

Ukupna godišnja (tromesečna (sezonska), mesečna, nedeljna ili dnevna) proizvodnja električne energije nekog vetrogeneratora može proceniti na:

$$E_g = \eta_{gen} \cdot \eta_{meh} \cdot \frac{P_n}{2} \cdot (\Psi(v > v_{in}) + \Psi(v > v_n)) \cdot H \quad (6)$$

gde je η_{gen} efikasnost generatora, η_{meh} efikasnost mehaničkih sklopova, a H broj sati u posmatranom periodu proračunavanja.

3. PRIMENA ZA VETROELEKTRANE

3.1 Proračun snage i energije jednog VG

Izrazi (5) i (6) mogu se jednostavno primeniti kod proračuna snage, odnosno proizvedene energije jednog vetrogeneratora na godišnjem nivou na bazi srednje godišnje brzine vetra. Ključni podaci o karakteristikama VG dobijaju se iz podataka proizvođača (*data sheets*), a o srednjoj godišnjoj brzini vetra sa vebajta *Global Wind Atlas* (GWA) [6]. Rezultati procene srednje snage i godišnje proizvedene energije pri srednjoj godišnjoj brzini vetra od 6,12 m/s (vrednost dobijena iz [7] za lokaciju u jugoistočnom Banatu) za nekoliko VG poznatih svetskih proizvođača, dati su u tabeli 1 [5]:

Međutim, rezultati procene dati u tabeli 1 relevantni su za jednu (fiksnu) lokaciju VG, što ne mora biti dovoljno dobro u slučaju vetro-parkova sa razuđenim pozicijama VG-a.

Tabela 1. Procenjene vrednosti srednje snage i godišnje proizvodnje za nekoliko većih VG [5]

Vetrogenerator	V112-3.08 Vestas	SWT-3.0-101 Siemens	N131/3000 Nordex	GE 3.2-130 General Electric
Nominalna snaga, P_n [MW]	3.08	3.0	3.0	3.2
Polazna brzina, v_{in} [m/s]	3,0	3,0	3,0	2,0
Nominalna brzina, v_n [m/s]	12,0	12,5	11,5	12,0
Zaustavna brzina, v_{out} [m/s]	25,0	25,0	20,0	25,0
Dužina lopatica, R [m]	56	50,5	65,5	65
Visina stuba, h [m]	94,0	115	114	110
Srednja godišnja brzina vetra, v_{SR} [m/s]	6,12	6,12	6,12	6,12
Srednja snaga VT, P_{tSR} [MW]	1,147	1,121	1,154	1,331
Godišnja proizvodnja, E_g [MWh]	10.048,1	9.823,3	10.109,8	11.657,9

3.2 Proračun godišnje snage i energije za veće VE

Male vetroelektrane obično imaju ukupnu snagu manju od 10 MW i povezane su na distributivnu mrežu. Sastoje se od tri ili četiri VG, koje su raspoređene na rastojanju od stotinjak metara. Primeri takvih VE u Srbiji su VE „Kula“ (tri VG, ukupna snaga 9,9 MW) ili VE „Malibunar“ (četiri VG, ukupna snaga 8 MW). U tim slučajevima, gornje procene mogu dati adekvatne podatke za operativnu upotrebu.

Međutim, ako se opisani metod primeni za veće VE, odnosno vetroparkove, koji imaju VG raspoređene na većim udaljenostima, može se desiti da se dobije nedovoljno tačna procena. Odstupanje se javlja usled različitih lokalnih vrednosti brzina vetra. Da bi se dobila procena veličine ovog mogućeg odstupanja, uzet je primer vetroparka „Čibuk 1“, smeštenog na jugu Banata, duž zapadne granice nacionalnog parka „Deliblatska peščara“. Na slici 2 prikazan je raspored VG (slika 2, levo) [8], kao i lokalne srednje godišnje brzine vetra dobijene iz izveštaja sa sajta GWA za neke VT (slika 2, levo), odnosno izveštaj za VT7 (slika 2, desno) [6]. Može se videti da ima značajnih odstupanja i da se srednje godišnje brzine vetra kod najsevernije (VT23) i najjužnije (VT64) razlikuju za čak 0,3 m/s. Primenom gornje metode uz podatak za samo jednu lokaciju može se napraviti greška od oko 350 MWh/god. (pretpostavljeno je da su primenjene VT sa slike 1).

Međutim, gornje procene bazirane su na usrednjavanju na nivou godine. Oni zbog toga ne odslikavaju sezonske, mesečne ili dnevne varijacije snage. Da bi se to sagledalo, potrebno je usrednjavanje brzine vetra u ovim kraćim vremenskim intervalima, odnosno poznavanje većeg broja podataka, koji se mogu dobiti samo iz merenja tokom pripreme faze za VE ili tokom eksploatacije VE.

3.3 Proračun snage i energije veće VE za kraće vremenske intervale

Jedan od većih problema primene nekih oblika obnovljivih izvora, a naročito vetra je njihov intermitentni karakter. Da bi se on sagledao, potrebno je imati podatke za kompletni godišnji ciklus merenja brzine vetra i drugih relevantnih podataka. Na bazi njih moguće je uraditi procene prosečne snage (u kW) i proizvedene energije (u MWh) za kraće vremenske intervale (sezonski, mesečno, nedeljno, dnevno) primenom gore opisane metode. Rezultati ovakve procene na mesečnom nivou za podatke iz preliminarnih merenja u jugoistočnom Banatu [7] prikazani su na slici 3. Istovremeno, operativni podaci o mesečnoj proizvodnji na bazi realnih merenja za VE „Čibuk 1“ [8], prikazani su na slici 4. Na oba dijagrama date su trend-linije za snagu (plavom bojom), odnosno za proizvodnju (crvenom bojom). Može se uočiti njihova sličnost, što potvrđuje opravdanost primene opisane metode.

Usrednjavanjem na nedeljnom ili dnevnom nivou mogu se dobiti precizniji proračuni. Međutim, i ovi rezultati ne moraju uvek biti adekvatni, jer se brzina vetra i dugoročno menja, tj. ne mora se ponavljati iz godine u godinu.



Slika 2. VE „Čibuk 1“: raspored VG i srednje godišnje brzine vetra (levo) i izveštaj GWA za VT7 (desno)

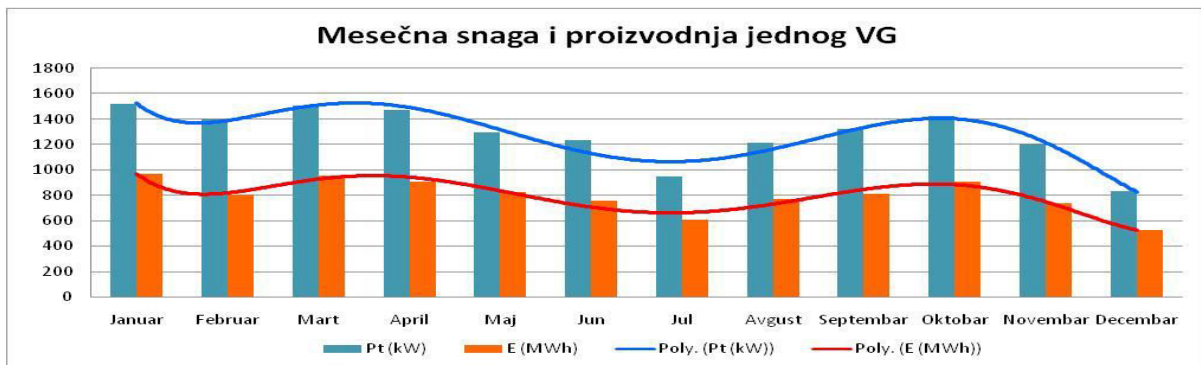
4. UTICAJ NA KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE

Zbog velike dinamike promene brzine vetra, opisani efekat je najizraženiji ako se posmatra dnevna promena snage. Na slici 5 dat je prikaz promene snage jedne VT (sa slike 1) tokom najvetrovitijeg meseca (januar) za podatke iz [7]. Mogu se uočiti velike oscilacije, ali i duži periodi bez vetra. Ovakva dinamika donosi niz problema vezanih za stabilnost elektroenergetskog sistema rezultirajući u mogućem probijanju operativnih limita napona i frekvencije definisanih domaćim i stranim standardima [5], odnosno značajnim uticajem na kvalitet električne energije.

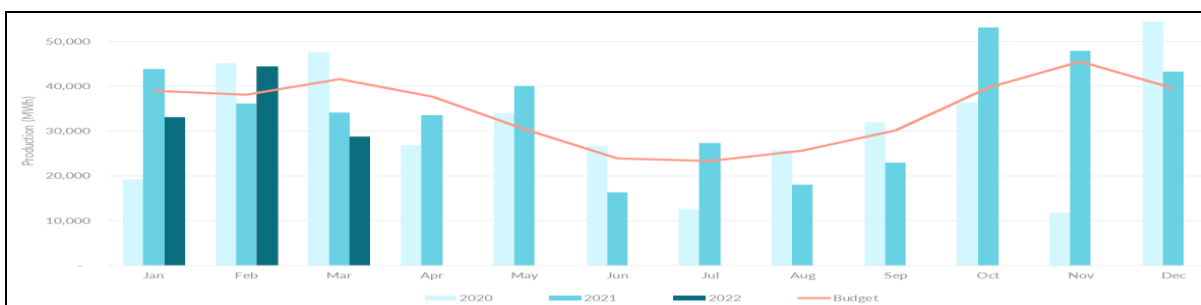
Pojam kvaliteta električne energije obuhvata više aspekata od kojih su najznačajniji kvalitet isporuke, kvalitet isporučene električne energije i komercijalni kvalitet električne energije [10]. Kod VE javlja se ugrožavanje kvaliteta i isporuke i isporučene električne energije, tako da im treba pokloniti odgovarajuću pažnju.

4.1 Uticaj na kvalitet isporuke električne energije

Varijacije snage VT, odnosno VE, prikazane na slikama 3 i 4, a naročito na slici 5 mogu se razmotriti sa strane kvaliteta isporuke električne energije. Vidi se velika intermitentnost, odnosno da postoje periodi rada sa nominalnom snagom, redukovanom snagom, ali i nultom (bez vetra). Na primer, za podatke sa slike 5 (mesec januar) može se utvrditi da će VE raditi sa nominalnom snagom tek 5,9% vremena, 74,4% sa redukovanom snagom (u radnoj zoni VT), odnosno čak 19,8% vremena sa nultom snagom, tako da će srednja mesečna snaga biti 1515,4 kW ili 0,49 P_n (prikazano crvenom isprekidanom linijom na slici 5). To ukazuje i na iskorišćenost VE od 49,2%. Bitno je i uočiti i dinamiku promene, odnosno brzinu promene snage tokom rada VE, koja iznosi oko 0,3 – 0,4 P_n/h , što može značajno da utiče na rad EES-a.



Slika 3. Mesečna snaga i proizvodnja električne energije i polinomijalna trend-linija za VT sa slike 1

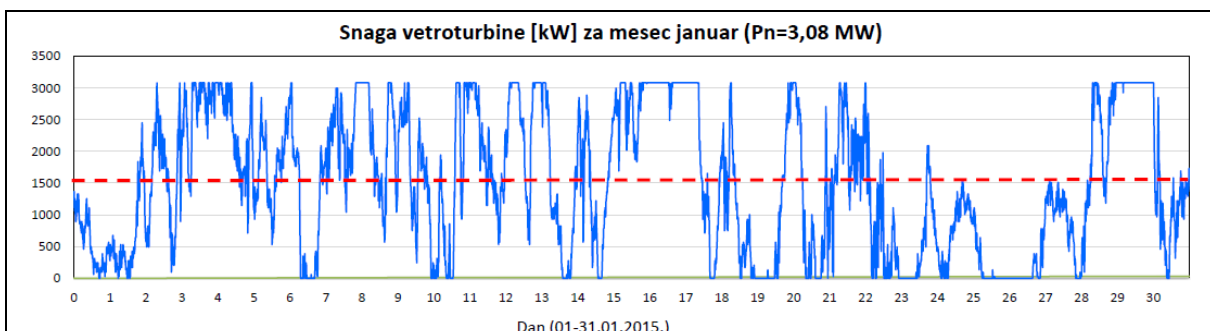


Slika 4. Mesečna proizvodnja električne energije i trend-linija za VE „Čibuk 1“ [8]

Postoje razna rešenja da se uticaj ovih varijacija umanja ili eliminiše, kao što su:

- adekvatno planiranje lokacije VE, tako da komplementarni rad različitih VE smanji uticaj intermitencije,
- upravljanje sistemom na bazi usaglašavanja proizvodnje električne energije sa potrošnjom,
- povezivanje sa drugim izvorima energije (hibridne elektrane),
- kvalitetna prognoza energije vetra,
- projektovanje odgovarajućeg upravljanja u cilju ublažavanja varijacija brzine vetra,
- primena elektroenergetskih skladišta različitih tehnologija, ili
- sveobuhvatne strategije upravljanja pomoću dvostrukih pretvarača energetske elektronike,

ali u ovom radu nema prostora za njihovo dalje elaboriranje.



Slika 5. Dnevna promena snage vetroturbinе sa slike 1 za podatke iz [7]

4.2 Uticaj na kvalitet isporučene električne energije

Savremeni VG najčešće su zasnovani na asinhronom generatoru, bilo kao klizno-kolutnom, odnosno dvostruko napajanom (*DFIG – Doubly Fed Induction Generator*), bilo kaveznom, ili na sinhronom generatoru (sa namotanom pobudom ili permanentnim magnetima). Oni su povezani na mrežu preko pretvarača energetske elektronike (dvostruki pretvarač ili *Back-to-Back Converter*), koji predstavljaju vrstu interfejsa između generatora i mreže, te vrše odvajanje i adaptaciju parametara generisane električne energije sa zahtevima mreže. Oni mogu da obezbeđuju i dodatne servise, kao što su rad u slučaju kvara u mreži (FRT ili LVRT) i sl. [5].

Zbog svoje prekidačke prirode i metodama upravljanja baziranim na impulsno-širinskoj modulaciji (PWM), izlazni talasni oblici napona i struje pomenutih pretvarača bogati su višim harmonicima, tako da je neophodna primena odgovarajućih LC ili LCL filtera prema mreži. Time se značajno umanjuje nivo viših harmonika i svodi na dozvoljene vrednosti, odnosno obezbeđuje kvalitetnu isporuku električne energije.

Međutim, kod VE gde se pojavljuje niz ovakvih VG na različitim, međusobno udaljenim lokacijama, povezanih internom kablovskom mrežom, transformatorima, sa postavljenim kondenzatorskim baterijama za kompenzaciju, te sa različitim režimima rada i stanjima LCL filtera moguća je pojava rezonancije (serijske i/ili paralelne) ili nekih od negativnih efekata viših harmonika (brže starenje izolacije, dodatni gubici, povećanje temperature transformatora, mogućnost rezonancije i sl.) [11]. Analiza ovakvih sistema je složena, jer dolazi do međusobne interakcije generisanih harmonika, pogotovu ako se više VE nalaze u blizini [12]. Za modelovanje, obično se koristi impedasni model, a VG se aproksimira strujnim izvorom viših harmonika [11-14]. Time se može simulirati međusobna interakcija VE, kao i testirati moguće mere prevencije (FACTS, pasivni ili aktivni Filteri, Sinhroni Var Generator, rekonfiguracija interne mreže i sl.) [12, 14].

5. ZAKLJUČAK

Za inženjersku procenu rada i proizvodnje jednog VG ili neke VE mogu se koristiti opšte raspoloživi podaci sa specijalizovanih vebajtova (na primer GWA), ali ona bazira na srednjim godišnjim vrednostima brzine vetra. Za bolje sagledavanje dinamike rada VE potrebni su precizniji podaci sa pripremljenih ili operativnih merenja. Uz te podatke, metoda daje adekvatne rezultate, a njena primena je opravdana jer oko 75% brzina vetra je u domenu radne zone VT.

Međutim, velika dinamika energije vetra proizvodi i velike oscilacije snage VG, što negativno utiče na kvalitet isporuke električne energije. Dodatni problem je generacija viših harmonika, pa su potrebne posebne mere zaštite.

ZAHVALNICA

Ovaj rad podržan je od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije kroz integrisani interdisciplinarni naučni projekat „Inovativna naučna i umetnička istraživanja iz domena delatnosti Fakulteta tehničkih nauka“ pod brojem 451-03-68/2022-14/200156.

LITERATURA

- [1] ***, 2022, „Wind Energy in Europe-2021 Statistics and the outlook for 2022-2026“, Wind Europe, Brussels, www.windeurope.org
- [2] Ž. Đurišić, 2019, „Vjetroelektrane“, Akademska misao, Beograd.
- [3] <https://www.thewindpower.net>
- [4] Sohoni V., Gupta S. C., and Nema R. K., 2016, „A Critical Review on Wind Turbine Power Curve Modelling Techniques and Their Applications in Wind Based Energy Systems“, *Journal of Energy*, Vol.2016, Article ID 8519785, pp.1-18, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8519785>
- [5] Katić V.A., 2021, „Metod za inženjersku procenu proizvodnje vetroelektrane“, *Zbornik radova LXV konferencije ETRAN*, Etno selo Stanišić, Bjeljina, RS-BIH, 8-10. Sep. 2021, Rad. br. EE1.1, pp.1-4, https://www.etrans.rs/2021/zbornik/Papers/033_EE_1.1.pdf
- [6] <https://globalwindatlas.info/>
- [7] M. Hrnjak, 2021, „Glavne karakteristike i komponente vetroelektrane u jugoistočnom Banatu“, Master rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.
- [8] ***, 2022, „Monthly Operation Report – Wind Farm Čibuk 1“, Vetroelektrane Balkana – A Tesla Wind Company, Belgrade (po odobrenju)
- [9] ***, 2020, SRPS EN 50160:2012/A2:2020, „Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks“, Institute for Standardization of Serbia, Belgrade.
- [10] Katić V.A., 2002, „Kvalitet električne energije – viši harmonici“, Monografija, Edicija: Tehničke nauke– Monografije, Br.6, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.

- [11] Zheng R., Bollen M., **2010**, „Harmonic Resonances Associated with Wind Farms“, Report, Lulea University of Technology and Skelleftea Electric Power Systems, Lulea (Sweden), <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:996973/FULLTEXT01.pdf>
- [12] Shi J., Chen W., Wei Z., Pei X. and Sun X., **2022**, „Quantitative Analysis of the Interactive Influence for Harmonic Emission in Wind Farms“, *Frontiers in Energy Research*, Vol.9, Article 820963.
- [13] Kocewiak L. et al., **2015**, „Wind Turbine Harmonic Model and Its Application - Overview, Status and Outline of the new IEC Technical Report“, 5th Solar and 14th Wind Intergration Workshop, Brusseles.
- [14] Quanchun Y. et al., **2021**, „Simulation analysis and suppression measures of harmonic resonance of offshore wind farm“, *Journal of Physics: Conference Series*, **1754** (2021) 012153. <http://doi:10.1088/1742-6596/1754/1/012153>